

SPIS TREŚCI

PRZEDMOWA.....	5
WYKAZ OZNACZEŃ I SKRÓTÓW	6
1. WPROWADZENIE	7
1.1. Co to jest system pomiarowy?	7
1.2. Konfiguracje systemów kontrolno-pomiarowych.....	8
1.2.1. Konfiguracja gwiazdzysta	8
1.2.2. Konfiguracja sieciowa.....	9
1.3. Pojęcie sygnału – sygnał analogowy a sygnał cyfrowy	10
1.4. Etapy przetwarzania sygnału pomiarowego	12
1.5. Specyfika pomiaru wielkości zmieniającej się w czasie.....	13
2. SYSTEMY LICZBOWE I SPOSOBY KODOWANIA LICZB	16
2.1. Zapis liczb w różnych systemach.....	16
2.2. Kodowanie liczb ujemnych w systemie dwójkowym.....	21
3. PRZETWARZANIE ANALOGOWO-CYFROWE I CYFROWO-ANALOGOWE SYGNAŁÓW	23
3.1. Różnice między sygnałem analogowym i cyfrowym.....	23
3.2. Kwantowanie i próbkowanie sygnału	24
3.3. Przetwarzanie analogowo-cyfrowe	25
3.4. Przetwarzanie cyfrowo-analogowe	31
4. RODZAJE PRZETWORNIKÓW ANALOGOWO-CYFROWYCH	35
4.1. Równoległe przetworniki AC	35
4.2. Kompensacyjne przetworniki AC	36
4.3. Przetworniki AC z podwójnym całkowaniem napięcia.....	38
4.4. Przetworniki AC typu delta-sigma.....	39
4.5. Przetworniki AC z przetwarzaniem potokowym.....	41
4.6. Przetworniki AC z zamianą napięcia na częstotliwość.....	42
5. TOR POMIARU WIELKOŚCI FIZYCZNEJ	44
5.1. Typowy schemat toru pomiarowego	44
5.2. Warunki prawidłowej współpracy elementów toru pomiarowego.....	45
5.3. Układy dopasowania napięcia i rezystancji.....	47
5.3.1. Układy wzmacniające napięcie	47
5.3.2. Układy obniżające napięcie	50
5.4. Układy współpracy z czujnikami pomiarowymi	52
5.4.1. Czujniki pomiarowe w układzie mostka Wheatstone’a.....	53
5.4.2. Termometry rezystancyjne	55
5.4.3. Termometry termoelektryczne	57
5.4.4. Termistory.....	62
5.4.5. Czujniki piezoelektryczne.....	64
5.4.6. Transformatorowe czujniki przemieszczenia.....	67
5.5. Multipleksery sygnałów analogowych.....	69
5.6. Układy separacji sygnałów	71

5.7. Układy próbkująco-pamiętające i śledząco-pamiętające	73
5.8. Filtry	74
5.8.1. Filtry pasywne	75
5.8.2. Filtry aktywne	76
5.8.3. Filtry z przełączaną pojemnością	76
5.9. Układy wyjściowe z przetworników A/C	78
5.10. Właściwości i parametry stacji akwizycji danych	78
6. ANALIZA CZĘSTOTLIWOŚCIOWA SYGNAŁÓW	81
6.1. Pojęcie sygnału w teorii sygnałów	81
6.2. Co to jest analiza częstotliwościowa sygnałów?	81
6.3. Sygnały czasu ciągłego	82
6.3.1. Sygnały okresowe (periodyczne)	82
6.3.1.1. Sygnał harmoniczny i jego model matematyczny	82
6.3.1.2. Analiza częstotliwościowa – szereg Fouriera	85
6.3.2. Sygnały nieokresowe – transformacja Fouriera	88
6.4. Sygnały czasu dyskretnego	90
6.4.1. Sygnał harmoniczny – aliasing częstotliwości	91
6.4.2. Analiza częstotliwościowa sygnałów o skończonej długości	94
6.4.2.1. Uwagi wstępne	94
6.4.2.2. Przekształcenie Fouriera	95
6.4.2.3. Przeciek widma	98
7. FUNKCJA KORELACJI WZAJEMNEJ I AUTOKORELACJI	101
7.1. Podstawy	101
7.2. Przykład zastosowania	104
8. FILTRACJA SYGNAŁÓW	106
8.1. Filtracja sygnałów czasu ciągłego	106
8.1.1. Sposób opisu charakterystyki filtra	106
8.1.2. Rodzaje filtrów często stosowane w praktyce	109
8.1.3. Analiza filtra RC pierwszego rzędu	111
8.2. Filtracja sygnałów czasu dyskretnego	115
8.2.1. Filtry nierekursywne	115
8.2.2. Filtry rekursywne	116
DODATKI	119
D.1. Zastosowanie mikrokontrolerów w systemach pomiarowych	119
D.1.1. Co to jest mikrokontroler?	119
D.1.2. Mikrokontrolery firmy Atmel z rodziny AVR	122
D.1.3. Przetworniki analogowo-cyfrowe wbudowane w mikrokontrolery AVR Xmega firmy Atmel	123
D.2. Programy komputerowe	126
D.2.1. Symulacja pracy przetwornika AC typu delta-sigma	126
D.2.2. Symulacja pracy przetwornika AC o przetwarzaniu potokowym	129
D.2.3. Analiza częstotliwościowa sygnału	131
INDEKS	133
LITERATURA	136

PRZEDMOWA DO WYDANIA I

Książka zawiera materiał do wykładów z przedmiotu *Metrologia i systemy pomiarowe w mechatronice*, prowadzonych dla studentów kierunku *Mechatronika* na Wydziale Mechanicznym Politechniki Łódzkiej. Celem wykładów jest przekazanie słuchaczom podstawowej wiedzy dotyczącej:

- a) komputerowych systemów pomiarowych,
- b) rejestracji wielkości fizycznych zmieniających się w czasie,
- c) analizy sygnałów.

Materiał starano się dostosować do poziomu przygotowania studentów, którzy zgodnie z obowiązującym programem studiów, jednocześnie z tym przedmiotem rozpoczynają wykłady z podstaw elektrotechniki i elektroniki. Z tego powodu w książce zabrakło dostatecznej analizy pracy układów elektronicznych, np. układów wykorzystujących wzmacniacze operacyjne. Nie objaśniono również kilku pojęć, użytych przy omawianiu niektórych urządzeń. Braki te są uzupełniane w trakcie wykładów stosownie do wiedzy słuchaczy, a zainteresowanych czytelników odsyła się do zamieszczonej na końcu książki bibliografii.

W *Dodatku* przedstawiono krótki opis mikrokontrolerów ze wskazaniem możliwości ich wykorzystania w układach pomiarowych. Jest to zagadnienie szczególnego znaczenia dla mechatroników, jednak wyczerpujące potraktowanie tego rozległego tematu znacznie przekraczałoby ramy książki.

W drugiej części *Dodatku* przedstawiono proste programy komputerowe, napisane w *Scilabie*. Dwa z nich symulują pracę przetworników analogowo-cyfrowych, trzeci modeluje okresowy sygnał i dokonuje jego analizy częstotliwościowej. Programy te mają na celu lepsze zrozumienie pracy symulowanych urządzeń i pokazanie, jak w łatwy sposób, za pomocą bezpłatnego oprogramowania, można uzyskać analizę widmową sygnału.

Autor pragnie podziękować Recenzentom książki: Panu prof. dr. hab. Zygmuntowi Kuśmierkowi z Politechniki Łódzkiej i Panu prof. dr. hab. Tomaszowi P. Zielińskiemu z Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Ich cennym uwagom podręcznik ten zawdzięcza obecny kształt. Jeśli jednak Czytelnik dostrzeże jakieś błędy, to są one wyłącznie winą autora, który będzie wdzięczny za wskazanie ich, a także za przesłanie wszelkich spostrzeżeń i zapytań na adres poczty elektronicznej: longin.horodko@p.lodz.pl

PRZEDMOWA DO WYDANIA II

Wydanie II ma formę elektroniczną. Nie ma w nim zmian merytorycznych w stosunku do wydania I, poprawiono jedynie drobne błędy, istniejące w poprzednim wydaniu, które zostały ujawnione w trakcie jego użytkowania.

WYKAZ OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

A	– wzmacnienie
AC	– analogowo-cyfrowy (przetwornik), analogowo-cyfrowe (przetwarzanie)
CA	– cyfrowo-analogowy (przetwornik), cyfrowo-analogowe (przetwarzanie)
E	– siła elektromotoryczna, napięcie nieobciążonego źródła napięcia
I, i	– prąd elektryczny
f	– częstotliwość zmian sygnału
f_N	– częstotliwość Nyquista
f_s	– częstotliwość próbkowania sygnału
FSR	– ang. Full Scale Range – pełny zakres
LSB	– ang. Least Significant Bit – bit najmniej znaczący
MSB	– ang. Most Significant Bit – bit najbardziej znaczący
q	– kwant wartości sygnału (równy wartości LSB)
R	– rezystancja
t	– czas, temperatura
T	– okres zmian sygnału
T_O	– okres obserwacji sygnału
T_s	– okres próbkowania sygnału
U, u	– napięcie
U_{we}	– napięcie wejściowe
U_{wy}	– napięcie wyjściowe
U_X	– napięcie mierzone
U_{zas}	– napięcie zasilające
x, y	– sygnały
x_A	– sygnał analogowy
x_C	– sygnał cyfrowy
δ	– błąd względny
Δ	– błąd bezwzględny
Δ_d	– błąd dynamiczny
Δ_Q	– błąd kwantowania
Δt	– różnica temperatur
ω	– pulsacja (częstość kołowa)

Indeks górny

* – sprzężenie zespolone

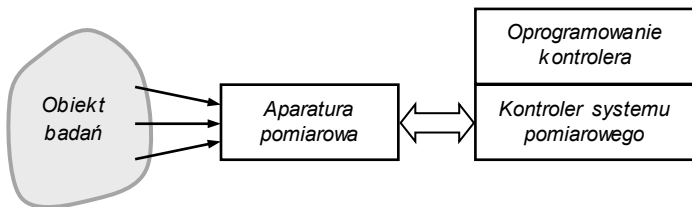
1. WPROWADZENIE

1.1. Co to jest system pomiarowy?

Najważniejsze pojęcia z dziedziny metrologii są zdefiniowane w słowniku metrologicznym [31]. Nie ma tam jednak hasła *system pomiarowy*, pomimo tego, że termin ten funkcjonuje powszechnie wśród polskich metrologów. Angielski zwrot *measuring system* tłumaczony jest oficjalnie jako *układ pomiarowy*, co wynika z faktu, że w wielu dziedzinach słowa *system* i *układ* są w języku polskim traktowane jako równoznaczne. Jednak w metrologii pojęcia te mają nieco odmienne znaczenia.

Układ pomiarowy jest zdefiniowany jako *kompletny zbiór przyrządów pomiarowych i innych zestawionych urządzeń, przeznaczony do wykonywania pomiarów* [31].

Pod pojęciem *system pomiarowy* zwykle rozumie się szczególny rodzaj układu pomiarowego, mianowicie taki, który wyposażony jest w urządzenie sterujące pracą całego układu. Urządzenie to nazywane jest kontrolerem systemu lub sterownikiem systemu i może nim być komputer ogólnego przeznaczenia lub inny element spełniający funkcje sterujące, np. komputer przemysłowy lub sterownik mikroprocesorowy. Nieodłączną częścią systemu pomiarowego jest oprogramowanie, które określa sposób pracy kontrolera, a poprzez kontroler – całego systemu.



Rys. 1.1. Ogólna struktura systemu pomiarowego

Ogólna struktura systemu pomiarowego jest przedstawiona na rys. 1.1. Wyodrębniono tam trzy bloki:

- aparatura pomiarowa,
- kontroler systemu pomiarowego,
- oprogramowanie kontrolera,

które mogą być traktowane jako podsystemy systemu pomiarowego, ponieważ każdy z nich składa się z wielu współpracujących ze sobą elementów, a więc też jest pewnym mniejszym systemem.

Aparatura pomiarowa (np. czujniki wielkości fizycznych, wzmacniacze sygnałów pomiarowych, przetworniki analogowo-cyfrowe) ma za zadanie prze-

tworzyć mierzone wielkości fizyczne do postaci, którą będzie w stanie przyjąć kontroler. Pierwszym etapem przetwarzania jest zwykle zamiana mierzonej wielkości na sygnał elektryczny. Jednym z następnych etapów jest zamiana postaci analogowej sygnału na postać cyfrową, ponieważ kontroler operuje sygnałami cyfrowymi. Przetwarzanie powinno być tak wykonywane, aby sygnały odbierane przez kontroler były możliwie wiernym odwzorowaniem mierzonych wielkości.

Kontroler systemu steruje aparaturą pomiarową, odbiera od niej sygnały, interpretuje je i przetwarza. Czynności te wykonuje zgodnie z instrukcjami programu kierującego zadaniem pomiarowym.

Spśród funkcji spełnianych przez system pomiarowy do najczęstszych należą:

- a) pomiar wielu wielkości;
- b) rejestracja wielkości zmieniających się w czasie;
- c) prezentacja wyników pomiarów i rejestracji;
- d) przesyłanie wyników pomiarów i rejestracji do odległych urządzeń;
- e) obliczanie wartości innych wielkości fizycznych niż zmierzone bezpośrednio;
- f) sterowanie funkcjami (a) – (e) za pomocą programu komputerowego, bez bezpośredniego udziału człowieka.

Niektóre systemy mają możliwość wysyłania sygnałów sterujących, które mogą być używane, na przykład, do zmiany cech obiektu badań. Takie systemy noszą nazwę systemów kontrolno-pomiarowych (od angielskiego słowa *control*, oznaczającego sterowanie).

Należy wspomnieć o innym, niż wyżej przedstawione, znaczeniu terminu *system pomiarowy*. Tym zwrotem określa się czasem urządzenie pomiarowe podłączane do komputera (np. do złącza USB), posiadające wejścia analogowych sygnałów napięciowych. Takie urządzenie jest nazywane w języku angielskim *data acquisition system*, a w języku polskim zwykle nosi nazwę: moduł (lub stacja) akwizycji danych. Moduły akwizycji danych często mają możliwość generowania sygnałów sterujących, a więc są w rzeczywistości modułami kontrolno-pomiarowymi.

1.2. Konfiguracje systemów kontrolno-pomiarowych

1.2.1. Konfiguracja gwiazdzista

Rysunek 1.1 przedstawia schemat systemu pomiarowego o konfiguracji gwiazdzistej, której cechą charakterystyczną jest istnienie jednego kontrolera systemu, obsługującego podłączoną do niego aparaturę kontrolno-pomiarową. Przesyłanie danych w tym systemie odbywa się zawsze za pośrednictwem kontrolera. Inne właściwości konfiguracji gwiazdzistej są następujące:

- możliwa duża szybkość transmisji i przetwarzania danych,
- możliwa duża, odpowiednia dla prac laboratoryjnych, dokładność pomiarów,
- system pomiarowy jest zwykle skupiony na niewielkiej przestrzeni,

- stosunkowo niski koszt systemu,
- rozbudowa systemu może być trudna lub wręcz niemożliwa.

Konfiguracja gwiazdista jest odpowiednia dla niewielkich systemów kontrolno-pomiarowych, zwłaszcza laboratoryjnych i diagnostycznych, np. do obsługi niewielkich stanowisk badawczych. Cechy tej konfiguracji posiada także wiele systemów pomiarowych spotykanych w mechatronice, w szczególności systemy wykorzystujące mikrokontrolery z wbudowanymi przetwornikami analogowo-cyfrowymi. Komputer lub mikrokontroler z podłączonym pojedynczym przyrządem pomiarowym też można traktować jako szczególny, maksymalnie uproszczony przypadek konfiguracji gwiazdистой.

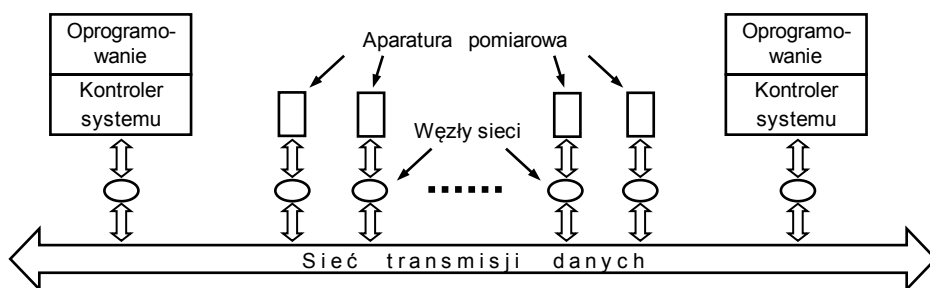
1.2.2. Konfiguracja sieciowa

W tej konfiguracji wszystkie elementy systemu podłączone są do sieci transmisji danych (rys. 1.2). Możliwe jest zastosowanie kilku kontrolerów systemu, każdy z własnym oprogramowaniem. Jednocześnie może pracować tylko jeden z nich. Zmiana kontrolera sterującego pracą systemu może się odbywać np. w przypadku awarii dotychczas pracującego kontrolera lub przy zmianie zadania pomiarowego. Oprócz kontrolerów systemu, z danych przesyłanych siecią mogą korzystać także inne komputery. Kontroler nie zawsze musi uczestniczyć w transmisji danych.

Cechy konfiguracji:

- możliwość obsługi systemu zlokalizowanego na dużej przestrzeni,
- stosunkowo łatwa rozbudowa i zmiany aparatury pomiarowej,
- proste okablowanie,
- stosunkowo droga aparatura pomiarowa i układy automatyki (każdy element z wbudowanym interfejsem sieciowym),
- szybkość transmisji i przetwarzania danych oraz dokładność pomiarów zwykle mniejsze niż w konfiguracji gwiazdистой (wystarczające do celów przemysłowych).

Konfiguracja sieciowa, zwana też magistralową, jest odpowiednia do tworzenia rozproszonych systemów kontrolno-pomiarowych (ang. *Distributed Control Systems – DCS*), np. do automatyzacji dużych obiektów przemysłowych.



Rys. 1.2. System kontrolno-pomiarowy o konfiguracji sieciowej

naklejonego na metalową membranę. Na jedną stronę membrany działa mierzone ciśnienie p_x , druga strona membrany znajduje się w otoczeniu ciśnienia atmosferycznego p_a . Mierzone ciśnienie odkształca membranę; na skutek tego odkształcenia zmienia się rezystancja tensometrów, zmiany tej rezystancji powodują zmianę wyjściowego napięcia niezrównoważenia mostka tensometrycznego U_{wyzM} . Napięcie to jest następnie wzmacniane i to wzmacnione napięcie U_{wyw} jest mierzone, to znaczy jest wyrażone w postaci iloczynu liczby i jednostki napięcia, jaką jest volt. Pomiar ten dokonywany jest za pomocą analogowego woltomierza magnetoelektrycznego.

Załóżmy, że osoba dokonująca pomiaru zna charakterystykę tego toru pomiarowego, i zmierzone napięcie mnoży przez pewien współczynnik k , aby otrzymać wartość liczbową zmierzonego ciśnienia w kilopaskalach. Współczynnik k jest wyrażony w kPa/V ($[k] = \text{kPa/V}$).

W przedstawionym torze pomiarowym występuje następujące przekształcanie wielkości fizycznych:

- 1) mierzone ciśnienie \rightarrow odkształcenie membrany;
- 2) odkształcenie membrany \rightarrow naprężenia tensometrów;
- 3) naprężenia tensometrów \rightarrow rezystancja tensometrów;
- 4) rezystancja tensometrów \rightarrow napięcie wyjściowe mostka Wheatstone'a;
- 5) napięcie wyjściowe mostka Wheatstone'a \rightarrow napięcie wyjściowe wzmacniacza;
- 6) napięcie wyjściowe wzmacniacza \rightarrow prąd w cewce miernika magnetoelektrycznego;
- 7) prąd w cewce miernika magnetoelektrycznego \rightarrow pole magnetyczne wokół cewki miernika;
- 8) pole magnetyczne wokół cewki miernika \rightarrow moment siły działający na cewkę;
- 9) moment siły działający na cewkę miernika \rightarrow obrót wskazówki o pewien kąt.

Wszystkie wymienione wielkości fizyczne są sygnałami analogowymi – zmieniają swoje wartości w ścisłej zależności od zmian wielkości mierzonej, czyli ciśnienia. W opisywanym torze pomiarowym występują również inne wielkości fizyczne: napięcia zasilające mostek tensometryczny i wzmacniacz, ciśnienie otoczenia, pole magnetyczne wytworzone przez magnes trwały miernika magnetoelektrycznego. Wynik pomiaru zależy od tych wielkości, jednak wielkości te nie są sygnałami (w znaczeniu metrologicznym, dla przedstawionego toru pomiarowego), ponieważ wartości tych wielkości nie zależą od wartości mierzonego ciśnienia. Sama wielkość mierzona jest również traktowana jako sygnał.

Powiedziano wyżej, że wskazanie miernika magnetoelektrycznego, będące jakąś liczbą odczytaną z jego skali, jest mnożone przez współczynnik charakteryzujący tor pomiarowy, w celu uzyskania wyniku pomiaru ciśnienia wyrażonego w kilopaskalach (kPa). To działanie, wykonywane na liczbach jest przedłużeniem przedstawionego toru pomiarowego, jest ono niezbędne dla uzyskania wy-

Kolejny etap przetwarzania, to zamiana sygnału z postaci analogowej na postać cyfrową. Ta zamiana odbywa się w przetworniku analogowo-cyfrowym (w skrócie – w przetworniku AC, ang. *analog-digital converter, ADC*). Przetwornik AC zamienia sygnał napięciowy na odpowiadającą mu liczbę naturalną zakodowaną dwójkowo.

Sygnał cyfrowy również podlega przetwarzaniu, którego celem jest odebranie sygnału przez kontroler systemu. Sposób przetwarzania zależy od interfejsu kontrolera: każdy interfejs ma swój specyficzny sposób przesyłania danych, zwany protokołem transmisji danych (ang. *data transmission protocol, communications protocol*). Słowo interfejs (ang. *interface*) występuje tu w znaczeniu układu elektronicznego, który zapewnia wzajemne połączenie różnych urządzeń, wymieniających między sobą dane cyfrowe.

Ostatnia faza przetwarzania danych ma miejsce w samym kontrolerze systemu. To przetwarzanie jest sterowane oprogramowaniem kontrolera, jego celem może być graficzna prezentacja zarejestrowanego sygnału, analiza harmoniczna tego sygnału i prezentacja jej wyników, itp.

1.5. Specyfika pomiaru wielkości zmieniającej się w czasie

Jeśli mierzona wielkość x zmienia się w czasie, to pojedynczy pomiar określa jej wartość w chwili pomiaru. Dokonując pomiaru w innym momencie, prawdopodobnie uzyskamy inną wartość. Stąd wynika, że chcąc precyzyjnie określić wielkość mierzoną x , jednocześnie z pomiarem tej wielkości należy dokonać pomiaru czasu i wynik tego pomiaru powinien towarzyszyć wartości wielkości x , np.:

Stan wody na Wiśle w Warszawie w dn. 02-05-2013 o godz. 06:00:00 UTC (uniwersalnego czasu koordynowanego) wynosił 229 cm.

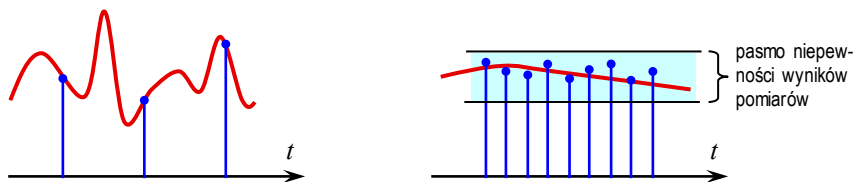
Zwykle celem pomiaru wielkości zależnej od czasu jest uzyskanie informacji o przebiegu mierzonej wielkości w funkcji czasu, o charakterze jej zmian zachodzących w czasie. Operacje mające na celu uzyskanie tych informacji i ich zapisanie będziemy nazywać **rejestracją wielkości fizycznej** lub **rejestracją sygnału**. Rejestrację można wykonać powtarzając pomiar wielokrotnie w pewnych odstępach czasu. Wyniki takich powtarzanych pomiarów nazywamy **próbkami** wielkości mierzonej. Na przykład, w celu rejestracji stanu wody, przytoczony wyżej pomiar należy powtarzać każdego dnia, co pozwoli, po pewnym czasie, sporządzić wykres stanu wody obrazujący jego zmiany zachodzące np. w okresie jednego miesiąca.

Dokonując rejestracji wielkości fizycznej zmieniającej się w czasie, napotykamy następujące problemy:

1. W jakich odstępach czasu należy powtarzać pomiary, aby uzyskać prawidłową rejestrację? Odstępy czasu powinny być na tyle małe, aby umożliwiły zaobserwowanie zmian rejestrowanej wielkości. Z drugiej strony zbyt duża częstotliwość pomiarów wytwarza nadmiarową informację: wyniki kolejnych pomiarów są jednakowe, bo zmiany sygnału są tak niewielkie, że mieszczą się

w granicach niepewności pomiarów (rys. 1.5). Aby dobrać odpowiedni okres powtarzania pomiarów należy więc posiadać pewne przybliżone wiadomości o charakterze zmian mierzonej wielkości.

Szerzej ten problem jest rozważany w rozdz. 6.4.1.



Rys. 1.5. Zbyt mała i zbyt duża częstotliwość pomiarów wielkości zależnej od czasu

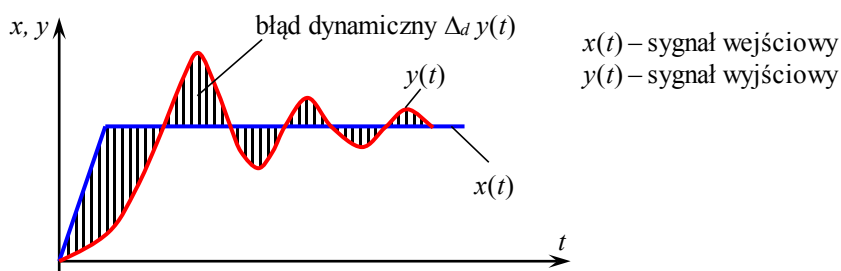
2. Każdy pojedynczy pomiar trwa pewien określony czas. Powoduje to następujące konsekwencje:

a) niepewność chwili pomiaru – nie wiemy, której dokładnie chwili odpowiada uzyskany wynik pomiaru;

b) niepewność wyniku pomiaru wynikająca ze zmiany wielkości mierzonej w trakcie trwania pomiaru – nie wiemy, którą wartość z przedziału zmian zmierzaliśmy.

Aby te dwie niepewności zminimalizować stosowane są specjalne układy, tzw. układy próbkująco-pamiętające, o których można przeczytać w rozdz. 5.7.

3. Właściwości dynamiczne aparatury użytej w torze pomiarowym wprowadzają pewne zniekształcenia transmitowanego sygnału. Powoduje to powstanie błędu pomiaru, którego nie ma przy pomiarze wielkości niezależnych od czasu. Błąd ten spowodowany jest opóźnioną reakcją przyrządu pomiarowego na zmiany wielkości mierzonej. To opóźnienie powoduje, że zarejestrowany sygnał jest zniekształcony względem sygnału, który występuje na wejściu przyrządu rejestrującego.



Rys. 1.6. Przykład błędu dynamicznego

Błąd dynamiczny jest to różnica między sygnałem na wyjściu toru pomiarowego, a sygnałem na jego wejściu, spowodowana właściwościami dynamicznymi toru pomiarowego (rys. 1.6).

Przy takim określeniu błędu dynamicznego, zakładamy, że sygnał wyjściowy ma miarę wielkości wejściowej, czyli jest wyskalowany w jednostkach wielkości wejściowej. Na przykład przy pomiarze temperatury termometrem rezystancyjnym, jako wielkość wyjściową traktujemy wskazanie termometru wyrażone w °C, a nie rezystancję termometru wyrażoną w Ω .

Błąd dynamiczny zależy od szybkości zmian mierzonego sygnału i od właściwości dynamicznych przyrządu pomiarowego. Jest on funkcją czasu i można wyrazić go wzorem:

$$\Delta_d y(t) = y(t) - x(t) \quad (1.1)$$

gdzie:

$\Delta_d y(t)$ – błąd dynamiczny;

$y(t)$ – wynik pomiaru, wartość sygnału na wyjściu przyrządu pomiarowego;

$x(t)$ – wartość sygnału na wejściu przyrządu pomiarowego.

Minimalizacja błędu dynamicznego wymaga stosowania aparatury pomiarowej o właściwościach dynamicznych dostosowanych do szybkości zmian mierzonej wielkości.